

# 基于单轴气浮台摆动特性的调节平衡方法

林振华, 董云峰

北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

**摘要** 单轴气浮台不平衡产生的阻力矩直接影响实验结果的真实性。手动调节的缺点是需采用多次测试反复调节。本研究提出一个有效的简化模型, 并对模型进行力学分析, 得到气浮台空气轴承的倾角大小和方向与其摆动特性的关系。由所得关系推出一种快捷有效的调节方法: 控制空气轴承为微摆状态, 测量气浮台调节前空气轴承的摆动周期和摆动静平衡位置; 保证气浮台不发生变形, 调节气浮台立柱的长度, 控制空气轴承为微摆状态, 测量气浮台调节后空气轴承的摆动周期和摆动静平衡位置的角度变化; 求出空气轴承达到水平状态时各立柱所需调节的长度; 根据计算结果调节各立柱的长度。实验验证了该调节方法的可行性。

**关键词** 单轴气浮台; 空气轴承; 调平; 转动力矩

中图分类号 V416.8, O329

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)02-0046-04

## Balance of Single Axis Air Bearing Table Based on Its Swing Characteristics

LIN Zhenhua, DONG Yunfeng

School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

**Abstract** The unbalance of the single axis air bearing table may affect the accuracy of experiment results. Common manual adjusting is time-consuming. This paper proposes a simple and effective model. Based on the mechanical analysis of the model, one may obtain the relationship between the obliquity of the turntable and the swing characteristics of the air bearing table. With a limited range of the air bearing table's swing, the air bearing table's swing periods and the static equilibrium position are measured before adjusting. Keeping the form of the air bearing table unchanged, the table's legs are adjusted in length. With a limited range of the air bearing table's swing, the air bearing table's swing periods and the change of the air bearing table's angle are measured to determine the length of each leg to be adjusted. The length of each leg is adjusted accordingly. This method is validated by experiment.

**Keywords** single axis; air bearing table; balance; moment

### 0 引言

气浮台作为姿态控制系统的仿真手段, 几乎与卫星研制同时开始, 20 世纪 50 年代末到 60 年代, 美国相关研究单位先后建立的气浮台有 20~30 台。随后欧洲空间局荷兰仿真中心、日本也相继建立各种气浮台<sup>[1]</sup>。

单轴气浮台是中国航天工业总公司 502 研究所专门为现代卫星姿态控制而研制的多功能全物理仿真平台, 具有多路数据采集和实时监控的能力<sup>[2-3]</sup>。单轴气浮台是卫星单通道全物理仿真实验的关键设备, 用于模拟太空无摩擦环境下的运

动<sup>[4]</sup>。其基本原理为: 气浮台依靠压缩空气在气浮轴承与轴承座之间形成的气膜, 使空气轴承抬起, 实现近似于无摩擦的运动条件。由于单轴气浮台不平衡而产生的阻力矩直接影响实验结果的真实性<sup>[5]</sup>, 气浮台平衡调节是实验前的关键步骤, 而对单轴气浮台调平的研究甚少。普通调节方法为采用多次测试反复调节, 这种方法的缺点最大是调节时间长。若能通过简单测量, 根据测量结果和已知数据, 求出空气轴承达到水平状态各立柱所需调节的长度, 就能直接调节各立柱的长度。

收稿日期: 2009-08-05

作者简介: 林振华, 硕士研究生, 研究方向为卫星姿态与轨道控制, 电子信箱: linzhenhua2007buaa@126.com; 董云峰 (通信作者), 教授, 研究方向为卫星姿态与轨道控制, 电子信箱: sinosat@buaa.edu.cn

## 1 单轴气浮台

单轴气浮台由空气轴承、台体、测角装置、气源装置等组成<sup>[4]</sup>。气浮台工作面形状为一矩形,工作面由4根立柱支撑,各立柱可通过调节螺栓独自调节长度,顺时针转动立柱增长。分别给4根立柱编号(图1)。定义 $l_1$ 为立柱1、2(立柱3、4)之间的距离; $l_2$ 为立柱1、4(立柱2、3)之间的距离。 $P$ 为调节螺栓螺距。



图1 单轴气浮台

Fig. 1 Single axis air bearing table

## 2 方法研究

为了准确测量空气轴承的角位置,在气浮台上安装光栅计数器(光栅计数器的精度为1/5000转),空气轴承顺时针旋转时计数器读数增加,逆时针旋转时计数器读数减小。

### 2.1 建立坐标系

在水平面内,以空气轴承中心为坐标原点 $O$ , $x$ 轴平行于台面的长边建立坐标系(图2)。

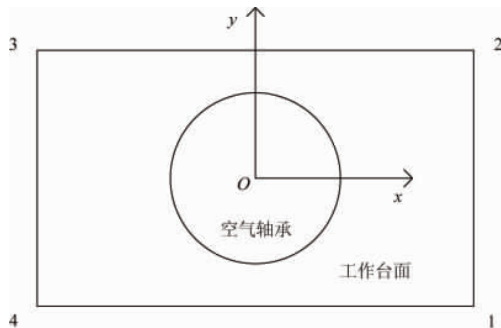


图2 坐标定义

Fig. 2 Coordinate system

### 2.2 模型假设

阻力矩的产生有多种因素,通常情况下空气轴承不平是产生阻力矩的首要因素,供气气流不均匀、气流温度变化、室内空气流动、台体的加工精度、安装精度等也会产生气浮台的不平衡。为获得一个有效的简化模型,现假设<sup>[6-7]</sup>:①供气气流均匀,温度无变化;②气流阻力忽略不计;③室内空气流动无影响;④台体加工精度非常高,忽略加工误差带来的影响。

### 2.3 力学分析及方法实现

空气轴承及其支撑物总重为 $G$ ,合重心为 $C$ ,总转动惯量

为 $I$ 。台面不平的情况下,空气轴承转动时,合重心 $C$ 位置随空气轴承转角周期性变化。当合重心在最低位置时,空气轴承达到静态平衡状态。如图3所示,定义空气轴承回转轴线 $z$ 与铅垂线的夹角 $\varphi$ 为空气轴承倾角, $S$ 为以 $z$ 上的某点为起始点,垂直于 $z$ 并指向静平衡状态下合重心 $C$ 的矢量,称 $S$ 为重心矢量。空气轴承相对静平衡位置转 $\theta$ 角,其位置如图4所示。

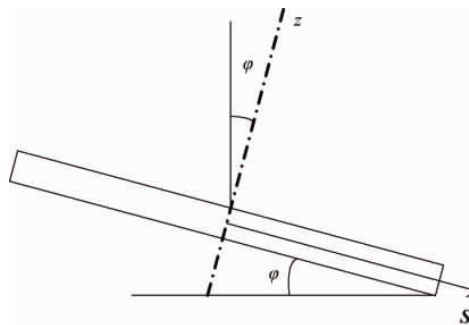


图3 空气轴承倾角和重心矢量示意

Fig. 3 Obliquity of air bearing table and barycenter vector

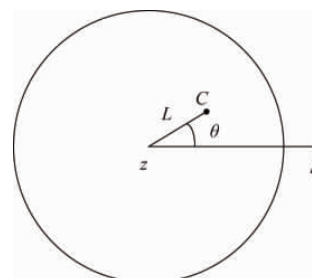


图4 空气轴承相对静平衡位置旋转 $\theta$ 角示意

Fig. 4 Air bearing table turning an angle  $\theta$  from the balance position

设 $C$ 与 $z$ 轴的距离为 $L$ ,对 $C$ 进行受力分析, $C$ 沿 $S$ 方向的重力分量为

$$G_s = G \sin \varphi \quad (1)$$

$G$ 产生的转动力矩为

$$MG = G_s L \sin \theta = GL \sin \varphi \sin \theta \quad (2)$$

$G$ 产生的角加速度为

$$\ddot{\theta} = \frac{M_G}{I} = \frac{GL \sin \varphi \sin \theta}{I} \quad (3)$$

当摆角 $\theta < 10^\circ$ 时,可认为空气轴承的摆动为微摆,其摆动为简谐运动<sup>[8-9]</sup>。重心角位置为

$$\theta = A \cos(\omega t + \phi) \quad (4)$$

其中, $A$ 为摆动幅度, $\omega$ 为摆动角频率, $\phi$ 为初始角位移。

摆动角频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{GL \sin \varphi}{I}} \quad (5)$$

空气轴承的倾角为

$$\varphi = \frac{\omega^2 I}{GL} \quad (6)$$

测量摆动周期为  $T$ , 空气轴承摆动角频率为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (7)$$

式(7)代入式(6)得

$$\varphi = \frac{4\pi^2 I}{GLT^2} \quad (8)$$

通常情况, 空气轴承静平衡状态下合重心位置和方向都未知, 假设  $S$  在  $Oxy$  坐标平面的投影  $S'$  与  $x$  轴正方向的夹角为  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < 2\pi$ ) (图 4)。

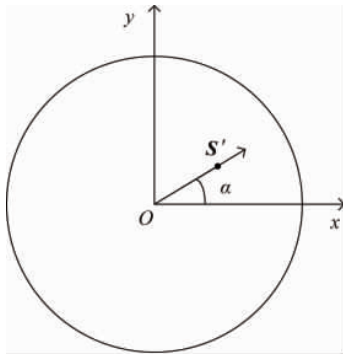


图 5 空气轴承静平衡状态下合重心矢量  $S'$  与  $x$  轴的夹角示意

Fig. 5 Angle between the air bearing table barycenter vector  $S'$  at the balance position and the axis  $x$

如图 6 所示,  $S'$  为重心矢量在  $Oxy$  坐标平面的投影,  $P_1, P_2, P_3, P_4$  分别为立柱 1, 2, 3, 4 的上端点位置。  $M, N$  为在  $Oxy$  平面内分别过原点  $O$  和  $P_4$  并与  $S'$  方向垂直的直线。  $S''$  为一过  $P_4$  并且与  $S'$  平行的矢量,  $P'_1, P'_2, P'_3$  分别为  $P_1, P_2, P_3$  在  $S''$  上的投影。

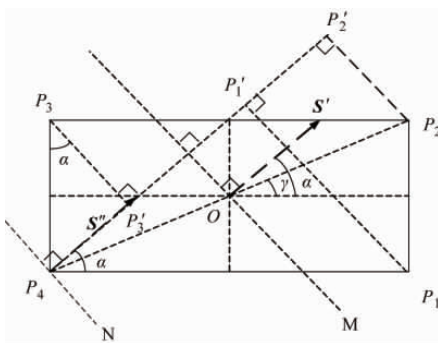


图 6 空气轴承倾斜方向示意

Fig. 6 Inclined direction of the air bearing table

空气轴承绕  $M$  转动某一角度可达到水平状态, 立柱 1、2、3、4 各需调节一定的长度。空气轴承绕  $N$  转动也可达到水平状态, 只需调节立柱 1、2、3 的长度。

以立柱 4 的长度为基准, 设立柱 1、2、3 分别需要调节  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  空气轴承达到水平状态。若  $P_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为调高,  $\delta_i > 0$

( $i=1, 2, 3$ ), 若  $P_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为调低,  $\delta_i < 0$  ( $i=1, 2, 3$ )。

当空气轴承绕  $N$  转动,  $P_1, P_2, P_3$  的高度变化与分别在  $S''$  上的投影点  $P'_1, P'_2, P'_3$  高度变化一致。空气轴承倾角为一小角度, 根据三角关系可得

$$\begin{cases} \delta_1 = l_2 \varphi \cos \alpha \\ \delta_2 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2} \varphi \cos(\alpha - \gamma) = l_1 \varphi \sin \alpha + l_2 \varphi \cos \alpha \\ \delta_3 = l_1 \varphi \sin \alpha \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\gamma$  为  $\overline{P_2 P_4}$  连线与  $x$  轴的夹角。由式(9)可知, 为使台面不发生扭曲变形, 立柱 1、2、3 调节长度满足

$$\delta_2 = \delta_1 + \delta_3 \quad (10)$$

由式(10)知,  $\delta_2$  与  $\delta_1, \delta_3$  线性相关, 方程组(9)简化为

$$\begin{cases} \delta_1 = l_2 \varphi \cos \alpha \\ \delta_3 = l_1 \varphi \sin \alpha \end{cases} \quad (11)$$

$S'$  与  $x$  轴的夹角为

$$\alpha = \arctan \frac{\delta_3 l_2}{\delta_1 l_1} \quad (12)$$

要确定  $\delta_1, \delta_2$ , 需要新的约束条件, 现对立柱 1、2、3 进行微调。对立柱螺栓转动  $\beta$  角, 若螺栓顺时针转动,  $\beta > 0$ , 若逆时针转动,  $\beta < 0$ 。

对立柱螺栓转动  $\beta$  角, 立柱调节长度

$$\Delta \delta = \frac{P\beta}{360} \quad (13)$$

对立柱 1 螺栓进行微调  $\beta_1$ , 立柱 1 调节长度

$$\Delta \delta_1 = \frac{P\beta_1}{360} \quad (14)$$

对立柱 3 螺栓进行微调  $\beta_3$ , 立柱 3 调节长度

$$\Delta \delta_3 = \frac{P\beta_3}{360} \quad (15)$$

保持台面不发生变形, 立柱 2 微量

$$\Delta \delta_2 = \Delta \delta_1 + \Delta \delta_3 \quad (16)$$

立柱 2 螺栓微调角度

$$\beta_2 = \frac{\delta_2}{P} = \beta_1 + \beta_3 \quad (17)$$

微调之后, 重心投影方向  $S'$  与  $x$  轴间的夹角为  $\alpha'$ , 控制摆动范围在  $10^\circ$  内, 测量摆动周期  $T'$ , 由式(8)得空气轴承倾角为

$$\varphi' = \frac{4\pi^2 I}{GLT'^2} \quad (18)$$

由式(8)、式(17)得

$$\varphi = \frac{\varphi' T'^2}{T^2} \quad (19)$$

重心在  $Oxy$  坐标平面内投影变化量

$$\Delta \alpha = \alpha' - \alpha \quad (20)$$

$\Delta \alpha$  可通过光栅计数器得出。

微调之后, 立柱 1、3 各需要调节  $\delta_1 + \Delta \delta_1, \delta_3 + \Delta \delta_3$  空气轴承方能达到水平状态。由式(11)、式(20)可得

$$\begin{cases} \delta_1 + \Delta \delta_1 = l_2 \varphi' \cos(\alpha + \Delta \alpha) \\ \delta_3 + \Delta \delta_3 = l_1 \varphi' \sin(\alpha + \Delta \alpha) \end{cases} \quad (21)$$

将式(11)、(14)、(15)、(19)代入式(21), 得



$$\begin{cases} \frac{l_2 \varphi' T'^2}{T^2} \cos \alpha + \frac{P \beta_1}{360} = l_2 \varphi' \cos(\alpha + \Delta \alpha) \\ \frac{l_1 \varphi' T'^2}{T^2} \sin \alpha + \frac{P \beta_3}{360} = l_1 \varphi' \sin(\alpha + \Delta \alpha) \end{cases} \quad (22)$$

利用 Matlab 解方程组, 求  $\alpha, \varphi'$ 。

立柱 1 调节量

$$\delta_1 + \Delta \delta_1' = l_2 \varphi' \cos(\alpha + \Delta \alpha)$$

立柱 3 调节量

$$\delta_3 + \Delta \delta_3' = l_1 \varphi' \sin(\alpha + \Delta \alpha)$$

由约束条件  $\delta_2 = \delta_1 + \delta_3$ , 得立柱 2 调节量

$$\delta_2 + \Delta \delta_2' + \delta_3 + \Delta \delta_3' = l_1 \varphi' \sin(\alpha + \Delta \alpha) + l_2 \varphi' \cos(\alpha + \Delta \alpha)$$

立柱 1、2、3 旋转角度分别为  $\beta_1'、\beta_2'、\beta_3'$ , 由式(13)得

$$\begin{cases} \beta_1' = \frac{360 l_2 \varphi' \cos(\alpha + \Delta \alpha)}{P} \\ \beta_2' = \frac{360 [l_1 \varphi' \sin(\alpha + \Delta \alpha) + l_2 \varphi' \cos(\alpha + \Delta \alpha)]}{P} \\ \beta_3' = \frac{360 l_1 \varphi' \sin(\alpha + \Delta \alpha)}{P} \end{cases} \quad (23)$$

## 2.4 操作步骤

- 1) 获取立柱距离  $l_1、l_2$ , 立柱调节螺栓螺距  $P$ ;
  - 2) 给气浮台供气, 空气轴承静平衡状态下, 光栅计数器清零;
  - 3) 使空气轴承摆动角范围小于  $10^\circ$ , 测量空气轴承的摆动周期  $T$ ;
  - 4) 对立柱 1、3 螺栓分别进行微调  $\beta_1、\beta_3$ , 对立柱 2 螺栓进行微调  $\beta_2$ ;
  - 5) 使空气轴承摆动角范围小于  $10^\circ$ , 测量空气轴承的摆动周期  $T'$ ;
  - 6) 空气轴承静平衡状态下, 记录光栅计数器读数  $n$ , 并计算  $\Delta \alpha$ ;
  - 7)  $l_1、l_2、T、T'、\beta_1、\beta_3、\Delta \alpha$  代入方程组(22), 求解  $\alpha, \varphi'$ ;
  - 8)  $\alpha, \varphi'$  代入式(23), 求解  $\beta_1'、\beta_2'、\beta_3'$ ;
  - 9) 对立柱 1、2、3 螺栓分别调节  $\beta_1'、\beta_2'、\beta_3'$ 。
- 为减小对摆动周期测量的误差, 可采用测量多个周期取平均值的方法。

## 3 实验验证

利用实验室现有气浮台设备进行测试验证。查阅气浮台技术说明书获取气浮台参数  $l_1=500\text{mm}, l_2=1800\text{mm}, P=0.5\text{mm}$ 。气浮台通气, 空气轴承静止状态下, 光栅计数器清零。使空气轴承小角度摆动, 测量摆动周期  $T=24.5\text{s}$ 。对立柱 1、2、3 螺栓分别顺时针调节 1 圈、2 圈、1 圈, 即  $\beta_1=360, \beta_2=720, \beta_3=360$ 。测量摆动周期  $T'=26.3\text{s}$ ; 空气轴承静平衡状态下, 光栅计数器读数为 362, 重心矢量指向角度变化,

$$\Delta \alpha = \frac{362 \times 2\pi}{5000} = 0.4549\text{rad}$$

将  $l_1、l_2、T、T'、\beta_1、\beta_3、\Delta \alpha$  代入方程组(22)得

$$\begin{cases} 1.6054 \varphi' \cos \alpha + 0.0005 = 0.5 \varphi' \sin(\alpha + 0.4549) \\ 0.4339 \varphi' \sin \alpha + 0.0005 = 1.85 \varphi' \sin(\alpha + 0.4549) \end{cases}$$

利用 Matlab 求解方程组<sup>[10]</sup>, 得

$$\alpha = 0.5735 \quad \varphi = 0.0026$$

将  $l_1、l_2、P、\alpha、\Delta \alpha、\varphi'$  代入式(23)得

$$\beta_1' = 1739 \quad \beta_2' = 2541 \quad \beta_3' = 802$$

按计算结果对螺栓进行调节。调节后, 控制空气轴承摆角在  $10^\circ$  内, 测量空气轴承摆动周期  $T'=83\text{s}$ , 空气轴承摆动周期显著增大, 由式(2)得, 同样摆角情况下, 重力产生的转动力矩较调节前相比为

$$\frac{M'_G}{M_G} = \frac{\varphi''}{\varphi} = \frac{T^2}{T'^2} = 0.087 \quad (24)$$

可见空气轴承和其承载物合重力产生的阻力矩显著减小, 说明假设模型成立, 方法有效可行。

## 4 结论

当空气轴承倾角产生的阻力矩为主要阻力矩时, 可建立简化模型。简化模型下, 当空气轴承处于微摆状态下, 其摆动近似为简谐振动。测量立柱调节前后空气轴承的摆动周期和静平衡角位置的变化, 可解算出静平衡角位置和空气轴承倾角, 从而得出各立柱螺栓的所需转动角度。

本方法与普通调节方法比较, 调节方向和调节量确定, 可实现快速调节。实验数据表明, 用该方法调节后, 空气轴承的摆动周期显著延长, 说明假设模型成立, 此方法可行。

## 参考文献 (References)

- [1] 林来兴. 试论气浮台仿真的功能[J]. 控制工程, 1983(4): 1-9.  
Lin Laixing. *Control Engineering of China*, 1983(4): 1-9.
- [2] 李季苏, 吴振满. 测试单轴气浮台转动惯量的一种方法 [J]. 航天控制, 1994(3): 60-73.  
Li Jisu, Wu Zhenman. *Aerospace Control*, 1983(4): 1-9.
- [3] 李季苏, 牟小刚. 挠性结构卫星物理仿真实验研究[J]. 航天控制, 1994(3): 32-38.  
Li Jisu, Mou Xiaogang. *Aerospace Control*, 1994(3): 32-38.
- [4] 李季苏, 牟小刚, 张锦江. 卫星控制系统全物理仿真 [J]. 航天控制, 2004, 22(2): 37-38.  
Li Jisu, Mou Xiaogang, Zhang Jinjiang. *Aerospace Control*, 2004, 22(2): 37-38.
- [5] 杨秀彬, 金光. 徐开. 三轴气浮台自动调节平衡和干扰力矩测试[J]. 空间科学学报, 2009, 29(1): 34-38.  
Yang Xiubin, Jin Guang, Xu Kai. *Chin J Space Sci*, 2009, 29(1): 34-38.
- [6] 贾杰, 祁灵, 张向阳, 等. 倾斜气浮台姿态控制系统设计及其全物理仿真实验方法[J]. 理论研究, 2008, 22(4): 43-48.  
Jia Jie, Qi Ling, Zhang Xiangyang, et al. *Theoretical Research*, 2008, 22(4): 43-48.
- [7] Young J S. Development of an automatic balancing system for a small satellite attitude control simulator[D]. Utah: Utah State University, 1998.
- [8] 张三慧. 大学物理学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
Zhang Sanhui. *College physics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] 黄成平. 谈普通物理学中的谐振子模型 [J]. 时代教育, 2009 (8): 109-119.  
Huang Chengping. *Time Education*, 2009(8): 109-119.
- [10] 张志涌, 杨祖樱. Matlab 教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.  
Zhang Zhiyong, Yang Zuying. *Matlab tutorial* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006.

(责任编辑 陈广仁)

